



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

# ①2 Offenlegungsschrift ①0 DE 199 25 790 A 1

⑤1 Int. Cl. 7:  
H 01 J 37/32  
B 23 K 10/00  
H 05 H 1/46  
C 23 F 4/00

②1 Aktenzeichen: 199 25 790.6  
②2 Anmeldetag: 5. 6. 1999  
④3 Offenlegungstag: 7. 12. 2000

DE 199 25 790 A 1

## ⑦1 Anmelder:

Institut für Oberflächenmodifizierung e.V., 04318  
Leipzig, DE

## ⑦2 Erfinder:

Böhm, Georg, Dipl.-Phys., 04299 Leipzig, DE; Frank,  
Wilfried, Dipl.-Phys. Dr., 04209 Leipzig, DE;  
Schindler, Axel, Dipl.-Phys. Dr.-habil., 04668  
Großbothen, DE; Bigl, Frieder, Dipl.-Phys. Prof. Dr.,  
04249 Leipzig, DE

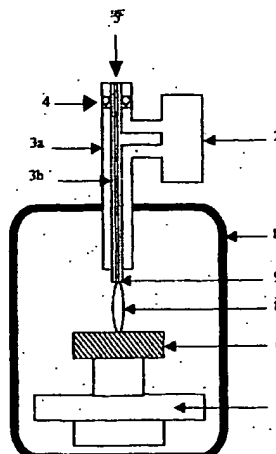
## ⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht zu ziehende Druckschriften:

DE	195 11 915 C2
DE	39 05 303 C2
DE	196 41 439 A1
DE	40 04 560 A1
DE	38 73 193 T2
FR	25 47 693 A1
US	53 02 237
US	50 63 329
US	46 11 108
EP	07 10 054 A1
WO	97 45 856 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

## ⑤4 Verfahren und Vorrichtung zur Bearbeitung von optischen und anderen Oberflächen mittels Hochrate-Plasmaprozessen

⑤7 Das erfindungsgemäß entwickelte Verfahren zur Hochratepräzisionsbearbeitung optischer und anderer Materialien auf der Basis eines durch plasmachemische Reaktionen hervorgerufenen Abtrags oder Auftrages von Substratmaterial von der Oberfläche bzw. auf die Oberfläche verwendet als Werkzeug eine erfindungsgemäße Plasmastrahlquelle, die einen hochreaktiven, formstabilen rotationssymmetrischen, räumlich vom erzeugenden System überwiegend getrennten lokalisierten Gasentladungsplasmastrahl durch ein Mikrowellenfeld am offenen Ende eines coaxialen Mikrowellenhohlleiters erzeugt gespeist wird, wobei der Innenleiter des Koaxialleiters so aufgebaut ist, daß in seinem Inneren zwei oder mehrere reaktive und/oder inerte Arbeitsgase separat an das als Düse wirkende, offene Ende des Innenleiters geführt werden können. Der Wirkungsquerschnitt des durch Wechselwirkung der ausströmenden Gase mit dem Mikrowellenfeld erzeugten Gasentladungsplasmas mit der Substratoberfläche ist in der Regel kleiner als die Abmessungen der Substratoberfläche und deren Formgebung durch Abtrag oder Auftrag erfolgt dadurch, daß Substrat und Werkzeug relativ zueinander mit wechselnder oder konstanter Geschwindigkeit linear und/oder rotierend bewegt werden. Auf Grund der axialen Dimension des Plasmastrahls von bis zu einigen zehn Millimetern kann dabei der Abstand zwischen Gasaustritt und Substratoberfläche so groß gewählt werden, daß auch die Bearbeitung stark gekrümmter oder strukturierter Oberflächen ...



1	Bearbeitungskammer
2	Mikrowellengenerator
3	3a / 3b Koaxialleiter mit Innenleiter 3b
4	Kurzschlußschieber
5	Gaseinlaß
6	Substrathalter
7	Lineares (x- und y-Richtung) und rotatorisch bewegliches System
8	Plasmastrahl
9	Gasaustritt

Schematische Darstellung einer Anordnung zur Hochratebearbeitung mittels des  
Plasmastrahlverfahrens mit Anwendung der Plasmaquelle in der Wand der Bearbeitungskammer.

DE 199 25 790 A 1

## Beschreibung

## Anwendungsgebiet

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung für die lokale Bearbeitung von Oberflächen mit hoher Abtrag- bzw. Abscheiderate mittels eines reaktiven, mikrowellenangeregten Plasmastrahles.

## Stand der Technik

Bekannte Bearbeitungsverfahren zur Herstellung präziser Oberflächenformen von Substraten oder auch Schichten insbesondere in der Optik, der Mikroelektronik oder der Mikrosystemtechnik sind bei materialabtragenden Verfahren neben den abrasiven Methoden Schleifen, Läppen, Polieren, Einkorndiamantdrehen oder -fräsen, naßchemische Ätzverfahren oder auch Ionen- bzw. Ionenstrahlätzverfahren bzw. Verfahrenskombinationen wie das chemomechanische Polieren. Bei den Abscheideverfahren sind das vor allem chemische Abscheideverfahren, CVD, physikalische Sputtering-Abscheidemethoden bzw. Laser- oder Plasmaabscheideverfahren. Plasmaverfahren haben sich in diesem Spektrum der Technologien als besonders vorteilhaft hinsichtlich hoher Prozeßgeschwindigkeiten infolge hoher Abtrag- bzw. Abscheideraten, hinsichtlich weitestgehender Materialschonung der bearbeiteten Substratoberflächen bzw. Schichten (kein mechanischer Kontakt zur Oberfläche bei der Bearbeitung) und auch hinsichtlich einer guten Steuerbarkeit (lokale sequentielle Bearbeitung mit oder ohne Masken) erwiesen.

Der Vorteil der Plasmaverfahren im Vergleich zu den Ionenverfahren liegt in der geringen kinetischen Energie der Ionen im Plasma und die dadurch bedingte geringe Schädigung oberflächennaher Schichten, wobei die Ionenenergie im Plasma mit steigender Anregungsfrequenz abnimmt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, in Abhängigkeit vom Druck (bis zum Normaldruck), Plasmen mit hoher Dichte an reaktiven Spezies zu erzeugen und damit hohe Abtrags- bzw. Abscheideraten zu realisieren und gleichzeitig den technischen Aufwand hinsichtlich der Vakuumtechnik beträchtlich zu reduzieren.

Dabei ist die von Zarowin und Mitarb. zur Erzeugung von Plasmen mit lokaler Wirkung verwendete Diodenanordnung [US Pat.-Nr.: 4,668,366], bei der die zu bearbeitende Oberfläche entweder direkt eine Elektrode einer HF-Parallelplattenanordnung selbst ist oder auf einer solchen montiert ist, nur unter Verlust des oben genannten Vorteils der geringen Ionenenergien einsetzbar. Ein entscheidender weiterer Nachteil ergibt sich bei sehr dicken und/oder dickeninhomogenen dielektrischen Substraten durch die damit verbundene starke bzw. inhomogene Schwächung des elektrischen HF-Feldes und damit der Ätzwirkung, die bei dieser Methode vor allem durch die kinetische Energie der Ionen bestimmt wird. Eine Alternative bieten sogenannte "downstream"-Anordnungen, bei denen das Plasma innerhalb einer vom Substrat unabhängigen, an einer Seite offenen Elektrodenanordnung erzeugt wird, infolge des Drucks der nachströmenden Gase an der offenen Seite mehr oder weniger weit austritt und dort mit der Substratoberfläche in Kontakt gebracht werden kann, wobei sich in Abhängigkeit von der gewählten Geometrie eine lokal begrenzte Wirkung z. B. in Form eines rotationssymmetrischen Abtragsprofils ergibt.

Darauf aufbauend ist in einer Reihe von Veröffentlichungen und Patenten der Gruppe um C. B. Zarowin die Formbearbeitung insbesondere optischer Oberflächen durch gezielte Überlagerung eines lokalen Materialabtrags in Verbindung mit Verweilzeitmethoden dargelegt ["Rapid, Nonmechanical, Damage Free Figuring of Optical Surfaces using

Plasma Assisted Chemical Etching (PACE)"; Parts I-II SPIE vol. 966 Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics (1988); pp. 82-97, Bollinger, et al.; "Predicted Polishing Behavior of Plasma Assisted Chemical Etching (PACE) from a Unified Model of the Temporal Evolution of Etched Surfaces"; SPIE vol. 966 Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics (1988) pp. 98-107, Gallatin, et al.; "Rapid, Non-Contact Damage Free Shaping of Optical & Other Surfaces with Plasma Assisted Chemical Etching" Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control (1989); IEEE pp. 623-626, Zarowin, et al.; "Rapid, Noncontact Optical Figuring of Aspheric Surfaces With Plasma-Assisted Chemical Etching", D. L. Bollinger, G. M. Gallatin, J. Samuels, G. Steinberg, C. B. Zarowin, Hughes Danbury Optical Systems, Inc., from SPIE vol. 1333 Advanced Optical Manufacturing and Testing (1990), pp. 2-14.; C. B. Zarowin, "Basis of Macroscopic and Microscopic Surface Shaping and Smoothing by Plasma Assisted Chemical Etching," J. Vac. Sci. Technol. B 12(6), Nov./Dec. 1994, pp. 3356-3362.; sowie die Patentschriften US 5,290,382, US 5,291,415, US 5,336,355, US 5,375,064, US 5,376,224, US 5,811,021]. Die dort beschriebenen Verfahren verwenden als Werkzeug ein RF-Plasma, das in einer nach einer Seite offenen Kammer aus einem Gemisch von Inert- und/oder Reaktivgasen geeigneter Zusammensetzung erzeugt wird, wobei sich infolge der gewählten Geometrie nur ein sehr geringer Teil des Plasmavolumens im Abstand von einigen Zehntelmillimetern bis wenige Millimeter außerhalb dieser Kammer befindet. Der Querschnitt der Wechselwirkung des austretenden Plasmas mit der im etwa gleichen Abstand gegenüber der offenen Seite der Plasmakammer befindlichen Substratoberfläche ist dabei kleiner als deren Abmessungen, und die Bearbeitung erfolgt durch geeignete Überlagerung der räumlich begrenzten Wirkungsquerschnitte indem Plasmakammer und Substratoberfläche relativ zueinander bewegt werden. Um unerwünschte Wechselwirkungen des in der Kammer befindlichen, reaktiven Plasmas mit den Kammerwänden, die gleichzeitig als Elektroden dienen, zu verhindern, müssen spezielle Werkstoffe eingesetzt werden [US 5,364,496]. Als erreichbare Ätzzraten werden für optische Materialien und Halbleiter (Si, SiO<sub>2</sub>) 3 µm/min angegeben, höhere Raten sind durch NF<sub>3</sub>-Zumischungen erreichbar, allerdings mit dem Nachteil einer nur schwer kontrollierbaren Geometrie der Abtragungsfunktion im Randbereich.

Wird die Geometrie der "downstream"-Anordnung dahingehend geändert, daß die Öffnung in der Elektrodenanordnung als Düse wirkt, durch die das im Inneren erzeugte Plasma infolge des Gasdrucks mit hoher Geschwindigkeit austritt, spricht man von einer Plasmastrahl-Anordnung. Der Vorteil einer solchen Anordnung besteht darin, daß auf Grund der axialen Dimension des erzeugten Plasma-Strahls mit einer Länge von einigen Millimetern bis einige Zentimeter die Bearbeitung von Substratoberflächen bei entsprechend größerem Abstand möglich ist. Damit eignen sich Plasmastrahlverfahren insbesondere für die lokale Bearbeitung strukturierter und gekrümmter Oberflächen.

Bárdos et al. berichten über die lokale Ätzwirkung eines durch eine HF-angeregte Hohlkathodengasentladung gebildeten reaktiven Plasmastrahls auf Silizium ["Superhigh-rate plasma jet etching of silicon", L. Bárdos, S. Berg, and H.-O. Blom, Appl. Phys. Lett. 55, 1615 (1989)] ohne allerdings Angaben über die Anwendung des Verfahrens zur gezielten Formbearbeitung Si-haltiger Oberflächen zu machen.

Takino et al. ["Computer numerically controlled plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode for optical fabrication", Appl. Optics 37, 5198 (1998)] beschrei-

ben die Formbearbeitung optischer Oberflächen mit Hilfe einer Plasmastrahl-Anordnung die bei hohem Druck (600–1000 mbar) betrieben wird und bei der ein Gasgemisch aus Helium und  $\text{SF}_6$  im Verhältnis 99 : 1 bei einem He-Fluß von 5 sl/min durch ein HF-gekoppeltes Rohr mit einem Innendurchmesser von wenigen Millimetern geführt wird und bei Austritt aus dem Rohr einen Plasmastrahl formt. Im Abstand von wenigen Zehntelmillimetern bis etwa 2 Millimeter ergibt sich eine signifikante Ätzwirkung insbesondere gegenüber der Rohrwandung auf Grund der erhöhten Sputterwirkung einer sich in diesem Bereich ausbildenden Plasmarandschicht mit erhöhter Ionenenergie. Die angegebenen Ätzzraten liegen im Bereich von 2,5 mm<sup>3</sup>/h.

#### Nachteile des Standes der Technik

Das für die lokale Formbearbeitung von Substratoberflächen nach Zarowin et al. beinhaltet im wesentlichen folgende Nachteile: (i) dadurch, daß das erzeugte Plasma nur einige Zehntelmillimeter bis wenige Millimeter über den Rand der Öffnung in der Elektrodenanordnung austritt, wird eine sehr starke Abstandsabhängigkeit der lokalen Wirkung der Plasmen von der Substratoberfläche sowie eine damit verbundene starken Abhängigkeit von Vibrationen der Anordnung, wie sie z. B. bei hohen Scangeschwindigkeiten der Mehrachsenbewegung auftreten können, bewirkt, was eine sehr aufwendigen Regelung zur Erzielung einer hohen Bearbeitungsgenauigkeit erforderlich macht und zum anderen die gesamte Dynamik der Bearbeitung begrenzt; (ii) Kontaminationsgefahr der bearbeiteten Oberfläche mit Fremdverunreinigungen, die vor allem aus der Wechselwirkung des intensiven lokalen Plasmas mit Konstruktionswerkstoffen der Plasmaquelle resultieren (besonders verstärkt wird ein solcher Ätzangriff der Reaktivspezies mit den Plasmaquellenwänden bei der Ausprägung von intensiven Hohlkathodenentladungen), damit verbunden (iii) erhebliche Probleme bei der Gewährleistung einer zeitlich und geometrisch stabilen Abtragfunktion des Plasmawerkzeuges infolge der Geometrieänderung der Plasmaquellenbauteile und (iv) ein hoher Verschleiß der präzisionsmechanischen Bewegungssysteme durch Korrosion infolge hochreaktiver Spezies, die bis zu diesen Teilen gelangen bzw. zur Vermeidung dessen ein hoher gerätetechnischer Aufwand durch geeignete mechanische Schutzvorrichtungen.

Das von Takino und Mitarb. beschriebene Verfahren "Computer numerically controlled plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode for optical fabrication" hat die entscheidenden Nachteile einer geringen Volumenabtragrate, die auch mit anderen, technisch einfacheren Verfahren (Ionenstrahlbearbeitung) erreichbar ist und einer sehr ungünstigen Geometrie des Abtragprofils in Form eines "Hohlstrahles", was zu erheblichen Problemen bei der Oberflächen-Präzisionsbearbeitung führt (mathematische Entfaltung, Bearbeitung kleiner Oberflächendetails).

Andererseits läßt sich der in (ii) beschriebene Nachteil der Kontamination der bearbeiteten Oberfläche bei intensiven Hohlkathodenentladungen bei bewußter Ausnutzung als technologisch vorteilhafte Variante zur lokalen Bearbeitung durch Materialabscheidung anwenden. Ein Patent von Bärδος und Mitarb. (EP 00,166,349) beschreibt ein solches Verfahren, wobei die Röhrenelektrode gleichzeitig als Opfermaterial zur Beschichtung dient.

#### Aufgabe der Erfindung

Aufgabe der Erfindung ist die Entwicklung eines Bearbei-

tungsverfahrens hoher Rate und einer diesbezüglichen Vorrichtung für die präzise, plasmastrahlgestützte Formbearbeitung planer oder gekrümmter bzw. glatter oder strukturierter Oberflächen von Substraten oder Schichten, z. B. Quarz, Si, SiC, GaAs oder andere, wobei die genannten Nachteile der bekannten technischen Lösungen überwunden werden sollen. Dies betrifft ebenfalls sowohl die Nachteile bekannter Lösungen hinsichtlich kurzer Lebensdauern präzisionsmechanischer Teile der Plasmaanlage, wie Translations- und Rotationstische und deren Elektronikkomponenten in der Bearbeitungskammer durch die Einwirkung langlebiger korrosiver chemischer Spezies, die sich in dem Gefäß ausbreiten, als auch die Nachteile zerstörerischer Wirkungen abgestrahlter Mikrowellenleistung auf elektronische Komponenten und organische Konstruktionsmaterialien in der Bearbeitungskammer.

#### Lösung der Aufgabe

Die gestellte Aufgabe wird dadurch gelöst, daß mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung (Plasmastrahlquelle) ein hochreaktiver Plasmastrahl definierter und skalierbarer Geometrie sowie hoher Dichte mit Hilfe eines Mikrowellenfeldes erzeugt wird, daß sich am Ende eines nach einer Seite offenen, koaxialen Mikrowellenhohlleiters, bestehend aus einem Außenleiter und einem Innenleiter geeigneter Geometrie, ausbildet, wobei der Innenleiter des Koaxialleiters aus zwei oder mehreren konzentrisch zueinander angeordneten Rohren geeigneter Querschnitte aufgebaut ist. Die Bildung des reaktiven Plasmastrahls erfolgt erfindungsgemäß durch Eindiffusion eines Gases, das über eines der äußeren Rohre zugeführt wird, in den durch Wechselwirkung eines Inertgasstromes mit dem Mikrowellenfeld gebildeten Plasmastrahl, der dadurch gleichzeitig eine zeitlich und räumlich stabile Form mit einer axialen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis zu einigen Zentimetern erhält. Dieses Gas enthält entweder die chemisch reaktiven Spezies bzw. es entstehen solche in der Plasmaentladung aus mindestens einem seiner Bestandteile. Von besonderer Wichtigkeit der erfindungsgemäßen Lösung ist es, daß der hochreaktive Plasmastrahl selbst keinen Kontakt mit dem System des Mikrowellenleiters bzw. des darin integrierten Gasführungssystems hat. Damit ist der im Vergleich zum bekannten Stand der Technik besonders vorteilhafte Aspekt der erfindungsgemäßen Lösung verbunden, daß das Plasma keinerlei Wandwechselwirkung außer mit dem Substrat selbst eingeht und demzufolge (1.) eine Kontamination mit chemischen Verunreinigungen sowohl des Plasmas als auch damit der Substratoberfläche unterbleibt und (2.) eine Übertragung der Wärme aus dem Plasmastrahl auf die Teile der Plasmastrahlquelle vermieden wird, was eine technisch aufwendige Kühlung der Umgebung des Plasmastrahlaustritts an der Plasmaquelle erübrigt.

Der Schwerpunkt der Anwendung liegt auf der effizienten Erzeugung vorwiegend präziser asphärischer Oberflächen-geometrien großer Abweichung von der Ausgangsgeometrie durch reaktiven Ätzabtrag des Materials. Aus ökonomischer Sicht stehen dabei kurze Bearbeitungszeiten durch Erreichen hoher Ätzabtragraten, große Langzeitstabilität des Plasmastrahles und seine hochgenaue Steuerbarkeit sowie eine minimale Wartung und einfache Handhabung der Ätzvorrichtung im Vordergrund. Der Wirkungsquerschnitt des erzeugten reaktiven Plasmastrahls mit der Substratoberfläche ist kleiner als die Abmessungen der Substrate. Er kann aber auch die Größe der Werkstücke bei kleinen Werkstücken haben bei erfindungsgemäßen weiteren Gestaltungsformen des Mikrowellenleiteres gemäß den bekannten technischen Prinzipien der Oberflächenwellenleiter (SURFA-

TRON-Prinzip, siehe z. B. M. Moisan, J. Margot and Z. Zakrzewski "Surface Wave Plasma Sources" in O. A. Popov (Ed.) "High Density Plasma Sources", Noyes Publications, Park Ridge, NJ, USA, 1995 insbes. Seiten 217-246).

Die Substratformgebung durch Abtrag erfolgt erfindungsgemäß dadurch, daß das Substrat, das sich in einem Substrathalter befindet, der vorteilhafterweise mit einer Substratheizung ausgestattet sein kann, und das Werkzeug (Plasmastrahl) relativ zueinander mit wechselnder oder konstanter Geschwindigkeit linear und/oder rotierend bewegt werden. Das geschieht in einem Vakuumgefäß bei einem Druck im Bereich zwischen 10 mbar und 1000 mbar, wobei die relative Bewegung zwischen Substrat und Plasmastrahlquelle, die sich erfindungsgemäß druckgekapselt im gleichem Vakuumgefäß befindet, durch ein rechnergesteuertes Bewegungssystem realisiert wird.

Unter bestimmten Umständen ist es zweckmäßig, daß diese Substratformgebung durch Ätzabtrag bei höheren Substrattemperaturen erfolgt.

Obwohl die hier insbesondere in dem Ausführungsbeispiel näher beschriebene technische Lösung auf ein Hochrateätzverfahren abhebt ist die erfinderische Lösung mit den gleichen technischen und ökonomischen Vorteilen zur Abscheidung von Materialien zur Formbearbeitung anwendbar, wenn man entsprechend geeignete Gase, die die abzuscheidenden elementaren oder molekularen Spezies enthalten, einsetzt.

Neben der in dem Ausführungsbeispiel angegebenen technischen Lösung zur lokalen Oberflächenbearbeitung durch eine verweilzeitgesteuerte Relativbewegung zwischen Substrat und Plasmastrahlquelle ist das erfindungsgemäße Verfahren ebenso mit Masken- bzw. Blendentechniken (z. B. Wechselmasken aus Al-Oxidkeramik versehen mit geometrischen Lochstrukturen) anwendbar um z. B. tiefe geometrische Strukturen oder Strukturarrays mit hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit und Genauigkeit in Substratmaterialien einzuarbeiten. Dabei ist wiederum das erfindungsgemäße Verfahren sowohl als Hochrateabtrag als auch als Hochrate-Abscheideverfahren anwendbar. Für besonders komplexe Bearbeitungsformen bzw. zur Bearbeitung großer Flächen sind auch Kombinationen z. B. der Relativbewegung Plasmaquelle-Substrat bei gleichzeitigem Einsatz einer strukturierten Wechselmaske des erfindungsgemäßen Verfahrens anwendbar, wobei sich zusätzliche technische bzw. verfahrensökonomische Vorteile gegenüber dem bekannten Stand der Technik ergeben.

Die Aufgabe des Korrosionsschutzes empfindlicher und teurer mechanischer Bewegungssysteme in der Bearbeitungskammer wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die gesamte Anlage während der Bearbeitung mit einem inertisierenden bzw. abschirmenden Hintergrundgasdruck beaufschlagt wird, wobei dieser Druck erfindungsgemäß dadurch hergestellt wird, daß ein geeignetes Gas mit der Schutzwirkung über Leitungen und Öffnungen direkt in die Gehäuse der präzisionsmechanischen, elektronischen und auch optischen und optoelektronischen Komponenten eingelassen wird von wo aus es durch vorhandene Öffnungen in den Raum der Bearbeitungskammer ausströmt. Damit wird eine effektive Spülung der schutzwürdigen Komponenten mit Frischgas gewährleistet und ein Kontakt mit korrosiven Bestandteilen effizient ausgeschlossen. Das Schutzgas, hier wurde in dem Ausführungsbeispiel Stickstoff aus einem Flüssiggastank verwendet, wird zusammen mit den anderen Gasbestandteilen in der Bearbeitungskammer über das Pumpsystem daraus entfernt. Der zerstörerische, schädliche Einfluß abgestrahlter Mikrowellenenergie auf Elektronikkomponenten und Kunststoffteile in der Bearbeitungskammer wird erfindungsgemäß dadurch unterdrückt bzw. ausge-

schaltet, daß ein hinreichend dimensionierter Absorber für die vagabundierende Mikrowellenstrahlung in der Bearbeitungskammer installiert wird. In dem beschriebenen Ausführungsbeispiel ist das ein wasserdurchflossener Kunststoffschlauch, der in mehreren Windungen in einigen Zentimetern Abstand von der Wand der Bearbeitungskammer angebracht wurde.

#### Vorteile der Erfindung

Die Vorteile der Erfindung bestehen darin, daß ein reaktiver Plasmastrahl hoher Dichte und in gewissen Grenzen skalierbarer Dimension unter Vermeidung parasitärer und damit meist nachteiliger erosiver Plasma-Wand-Wechselwirkungen erzeugt wird, mit dessen Hilfe plane, strukturierte und auch gekrümmte Oberflächen leitender und nichtleitender Substrate mit lateralen Abmessungen in einem großen Bereich von Millimetern bis zu Metern durch Überlagerung lokaler Wirkungsprofile mit Halbwertsbreiten von ca. 1 mm bis einige 10 mm mit hohen Abtragraten bis zu 20 mm<sup>3</sup>/min oder auch Auftragraten präzise formbearbeitet werden können ohne ungewollte Kontamination der Werkstückoberfläche durch Konstruktionsmaterialien und ohne einen kritischen Einfluß des Abstandes zwischen Substrat und Gasaustritt aus der Plasmastrahlquelle während des Bearbeitungsprozesses, da hier im Gegensatz zu bekannten Lösungen keine kritische Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes von diesem Abstand besteht. Weitere Vorteile der Erfindung sind die vergleichsweise zu beschriebenen Lösungen unaufwendigen Maßnahmen zum Schutz teurer Gerätekomponenten in der Bearbeitungskammer vor korrosiven Gasspezies und vor ungewollter Mikrowellenbestrahlung.

#### Teil B: Beispielbeschreibung

##### Beispiel 1

Im folgenden wird anhand eines Beispiels die Herstellung einer optischen Asphäre mit Hilfe des reaktiven Plasmastrahlätzens beschrieben. Abb. 1 zeigt schematisch die dazu verwendete Anordnung, bestehend aus einer vakuumtauglichen Bearbeitungskammer (1) aus korrosionsfestem Edelstahl, in der sich computergesteuert eine linear (x- und y-Richtung) und rotatorisch bewegliche sowie heizbare Werkstückaufnahme (6, 7) befindet und einem über einen Kurzschlußschieber (4) automatisch abstimmbaren Mikrowellensystem, bestehend aus einem Koaxialleiter (3a, 3b), dessen offenes Ende (9) sich ebenfalls innerhalb der Vakuumkammer befindet, sowie einem Mikrowellengenerator (2), der unmittelbar an das Koaxialsystem gekoppelt ist. Die Zuführung (5) der verwendeten Inert- bzw. Reaktivgase Ar/He bzw. SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> an das Ende des Koaxialleiters erfolgt über den Innenleiter (3b) der im Beispiel als doppelwandiges Rohr ausgebildet ist. Typische Prozeßparameter sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Ein Beispiel für das Querschnittsprofil der Abtragsfunktion des Plasmastrahls (8) ist in Abb. 2 dargestellt. Typische Abtragraten bei Quarz oder auch bei Siliziumkarbid sind 1-4 µm/s bei Halbwertsbreiten von 5-10 mm. Die resultierenden Volumenabtragraten liegen im Bereich von 1-20 mm<sup>3</sup>/min. Die axiale Dimension des Plasmastrahls beträgt in Abhängigkeit von den Prozeßparametern wenige Millimeter bis einige Zentimeter. Typisch sind ca. 20 mm. Die gezielte Überlagerung der lokalen Abtragsfunktionen zur Formgebung großflächiger Substrate erfolgt durch die computergesteuerte Bewegung des Substrats relativ zum Plasmastrahl zur Realisierung der, auf der Basis der lokalen

Abtragsfunktion, mathematisch simulierten, mittleren lokalen Verweilzeiten. Im vorliegenden Beispiel erfolgte diese Bewegung in Form des in Abb. 3 skizzierten Mäanders. Abb. 4 zeigt eine mit Hilfe des reaktiven Plasmastrahlätzens hergestellte Oberflächenform mit einer Bearbeitungstiefe von ca. 30 µm. Als Werkstück diente eine Scheibe aus poliertem Quarz mit einem Außendurchmesser von ca. 140 mm und einer Dicke von ca. 25 mm. Die Bearbeitungszeit betrug ca. 2 Stunden.

#### Beispiel 2

Das komplette Mikrowellensystem zur Erzeugung eines reaktiven Plasmastrahles (Plasmaquelle) kann sich zur Durchführung der Substratbearbeitung, die wie in Beispiel 1 beschrieben durchgeführt wird, auch in der vakuumtauglichen Bearbeitungskammer (Abb. 1, (1)) befinden. Dazu werden die einzelnen Komponenten in einen vakuumdichten und druckfesten Behälter installiert, der mit Luft oder einem inerten Gas zur Vermeidung von Hochspannungsüberschlägen gefüllt ist.

Diese so gekapselte Plasmastrahlquelle ist in Abb. 5 schematisch dargestellt.

In dem Quellengehäuse (10) befinden sich der Mikrowellengenerator (2), der Koaxialleiter (3a, 3b), der gegenüber der Bearbeitungskammer mittels der Vakuumdichtungen (13) abgedichtet ist und dessen offenes Ende, das gleichzeitig der Gasaustritt (9) ist, in die Bearbeitungskammer hineinragt. Der Gaseinlaß in den Innenleiter des Koaxialleiters (3b), der im Beispiel als doppelwandiges Rohr ausgebildet ist erfolgt über die Anschlüsse (5). Die Zuführung des Quellenfüllgases, im Beispiel Luft unter Atmosphärendruck, erfolgt über den Einlaß (12). Das Kühlwasser für die Kühlung des Mikrowellengenerators (2) wird über den Anschluß (13), der als Doppelrohrsystem ausgebildet ist, zu- und abgeführt. Die elektrischen Versorgungskabel und die Signalleitungen werden vakuumdicht an die Durchführungen (11) angeflanscht. Die Abstimmung des Mikrowellensystems erfolgt rechnergesteuert über den Kurzschlußschieber (4).

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Hochratebearbeiten von Materialoberflächen unter Verwendung einer Plasmastrahlquelle, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein hochreaktiver Plasmastrahl definierter und skalierbarer Geometrie sowie hoher Dichte mit Hilfe eines Mikrowellenfeldes erzeugt wird, das sich am Ende eines nach einer Seite offenen, koaxialen Mikrowellenhohlleiters, bestehend aus einem Außenleiter und einem Innenleiter geeigneter Geometrie, ausbildet, wobei der Innenleiter des Koaxialleiters aus zwei oder mehreren konzentrisch zueinander angeordneten Röhren geeigneter Querschnitte aufgebaut ist, die Bildung des reaktiven Plasmastrahls durch Eindiffusion eines Gases, das über eines der äußeren Rohre zugeführt wird, in den durch Wechselwirkung eines Inertgasstromes mit dem Mikrowellenfeld gebildeten Plasmastrahl erfolgt, der dadurch gleichzeitig eine zeitlich und räumlich stabile Form erhält, daß dieses Gas entweder die chemisch reaktiven Spezies enthält bzw. daß solche in der Plasmaentladung aus mindestens einem seiner Bestandteile entstehen, daß der hochreaktive Plasmastrahl selbst keinen Kontakt mit dem System des Mikrowellenleiters bzw. des darin integrierten Gasführungssystems hat und damit gewährleistet ist, daß das Plasma keinerlei Wandwechselwirkung außer mit dem Substrat selbst eingeht und damit von Fremdverunreinigungen frei ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine Prozeßgaskomponente  $\text{CF}_4$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{NF}_3$  oder  $\text{XeF}_2$  ist und der Plasmastrahl Kontakt mit der Oberfläche des Substrates hat und dabei ein Ätzabtrag erfolgt. Der Querschnitt des Plasmastrahles ist dabei kleiner als der Querschnitt des Substrates.

3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2 dadurch gekennzeichnet, daß das Trägergas der mikrowellenangeregten Plasmaentladung aus Ar oder He besteht.

4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 und 3, dadurch gekennzeichnet, daß eine weitere Komponente des Prozeßgases  $\text{O}_2$  ist.

5. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3 und 4 dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren bei einem Prozeßdruck von 10 mbar bis 1000 mbar in einem Gefäß, der Bearbeitungskammer, realisiert wird.

6. Plasmastrahlquelle nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß diese in einen gegenüber der Umgebung druck- und vakuumdicht gekapselten Behälter dergestalt eingebaut ist, daß das offene Teil des koaxialen Mikrowellenleitersystems und des im Innenleiter integrierten Gasführungssystems durch die Behälterwand nach außen hindurchragt.

7. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5 und 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Plasmastrahlquelle sich gemeinsam mit den Substraten in der Bearbeitungskammer befindet.

8. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4 und 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Plasmastrahlquelle dergestalt in die Wand der Bearbeitungskammer eingebaut ist, daß sich die Quelle außerhalb der Bearbeitungskammer befindet und daß das offene Teil des koaxialen Mikrowellenleitersystems und das im Innenleiter integrierte Gasführungssystem in die Bearbeitungskammer hineinragt.

9. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 8, dadurch gekennzeichnet, daß zur Oberflächenformgebung durch Ätzabtrag das Substrat sich in einem Substrathalter befindet und relativ zum Plasmastrahl mittels eines Mehrachsen-Bewegungssystems linear bewegt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 8, dadurch gekennzeichnet, daß zum Erreichen einer Formgebung durch Ätzabtrag das Substrat sich in einem Substrathalter befindet und relativ zum Plasmastrahl mittels eines Mehrachsen-Bewegungssystems linear und rotierend bewegt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 und 10, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich die Plasmaquelle relativ zum Substrat durch Drehung und oder Kippung und oder Abstandsänderung bewegt wird.

12. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 und 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Substrathalter heizbar ist und das Substrat auf höhere Temperaturen als Zimmertemperatur gebracht wird.

13. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 und 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Substrathalter nicht heizbar ist.

14. Plasmaquelle nach Anspruch 1, 6 und 7, dadurch gekennzeichnet, daß in die Anordnung eine berührungslose Temperaturmeßeinrichtung zur Messung der Substrattemperatur integriert ist.

15. Plasmaquelle nach Anspruch 1, 6, 7 und 14, dadurch gekennzeichnet, daß in die Anordnung ein optisches Emissionspektrometer integriert ist.

16. Plasmaquelle nach Anspruch 1, 6, 7, 14 und 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Ende des Innenleiters und das Ende des Außenleiters in einer Ebene liegen.

17. Plasmaquelle nach Anspruch 1, 6, 7, 14, 15 und 16, dadurch gekennzeichnet, daß das Ende des Innenleiters und das Ende des Außenleiters nicht in einer Ebene liegen.

18. Plasmaquelle nach Anspruch 1, 6, 7, 14, 15, 16 und 17, dadurch gekennzeichnet, daß der Innenleiter des genannten koaxialen Mikrowellenhohlleiters aus zwei oder mehr konzentrisch zueinander angeordneten Rohren aufgebaut ist und zwar so, daß zwischen den Rohren jeweils eine Lücke besteht, durch die ein Gas geführt werden kann.

19. Konfiguration nach Anspruch 1, 6, 7, 14, 15, 16, 17, und 18, dadurch gekennzeichnet, daß durch die genannten Rohre zwei oder mehr Gase oder Gasgemische getrennt an des Ende des genannten koaxialen Mikrowellenhohlleiters geführt werden und dort ausströmen.

20. Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß der Plasmastrahl Kontakt mit der Oberfläche des Substrates hat und dort durch die Wahl entsprechend geeigneter Prozeßgaskomponenten eine Formgebung durch gezielten Materialauftrag erfolgt.

21. Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen Plasmastrahl und Substrat strukturierte Wechselmasken, die aus Al-Oxidkeramik sein können, bzw. Blenden gebracht werden und damit mit hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit und Genauigkeit geometrische Strukturen eingearbeitet oder aufgetragen werden.

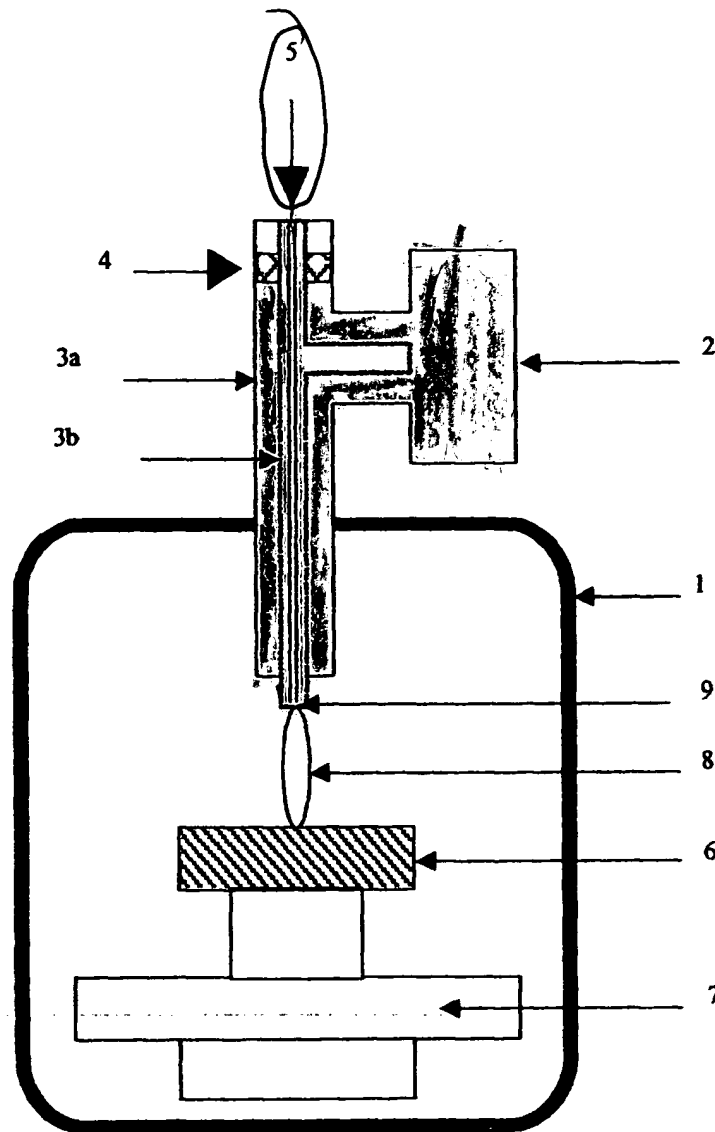
22. Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß zum Korrosionsschutz empfindlicher elektronischer, optischer, optoelektronischer und mechanischer Baugruppen in der Bearbeitungskammer diese während der Bearbeitung mit einem inertisierenden bzw. abschirmenden Hintergrundgasdruck beaufschlagt wird, wobei dieser Druck erfindungsgemäß dadurch hergestellt wird, daß ein geeignetes Gas mit der Schutzwirkung über Leitungen und Öffnungen direkt in die Gehäuse der präzisionsmechanischen, elektronischen, optischen und optoelektronischen Komponenten eingelassen wird, von wo aus es durch vorhandene Öffnungen in den Raum der Bearbeitungskammer ausströmt. Das Schutzgas, daß Stickstoff aus einem Flüssiggastank sein kann, wird zusammen mit den anderen Gasbestandteilen in der Bearbeitungskammer über das Pumpsystem aus dieser entfernt.

23. Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß zur Unterdrückung bzw. Ausschaltung des zerstörerischen, schädlichen Einflusses abgestrahlter, vagabundierender Mikrowellenenergie auf die Elektronikkomponenten und Kunststoffteile, die sich in der Bearbeitungskammer befinden, in dieser ein hinreichend dimensionierter Absorber für Mikrowellenstrahlung installiert wird, der ein in mehreren Windungen in einigen Zentimetern Abstand von der Kammerwand angebrachter und wasserdurchflossener Kunststoffschlauch sein kann.

---

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

---



**Abb. 1** Schematische Darstellung einer Anordnung zur Hochratebearbeitung mittels des Plasmastrahlverfahrens mit Anordnung der Plasmaquelle in der Wand der Bearbeitungskammer.

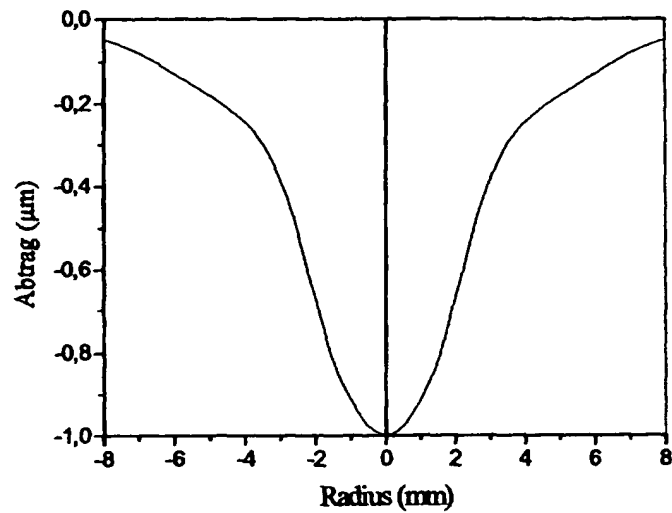


Abb. 2 Typisches Profil der lokalen Abtragsfunktion des reaktiven Plasmastrahls.

Tab. 1 Typische Prozeßparameter

Parameter	Einheit	Wert
Druck	mbar	100
Mikrowellenleistung	W	80
Gasfluß Ar	sl/min	0.3
Gasfluß SF <sub>6</sub>	sl/min	0.3



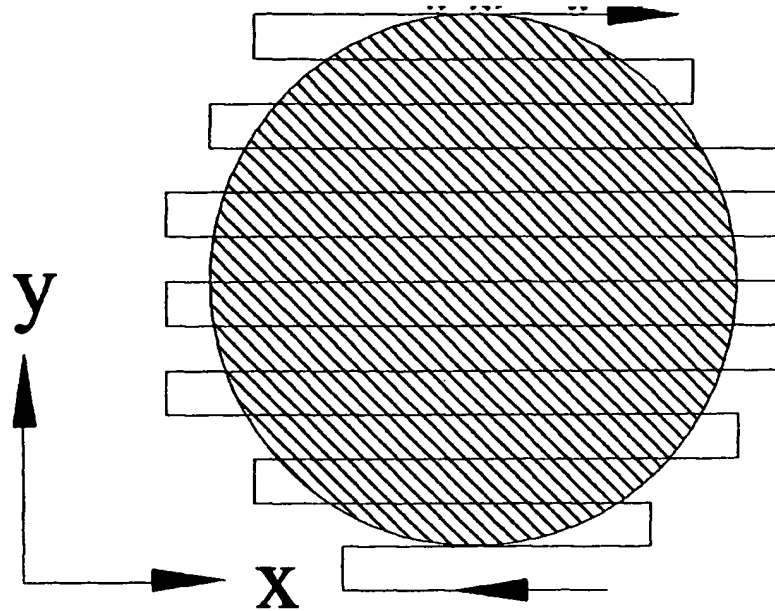


Abb. 3 Schematische Darstellung einer möglichen Bewegung des Werkstücks relativ zum Werkzeug realisiert über ein computergesteuertes x-y-Bewegungssystem.

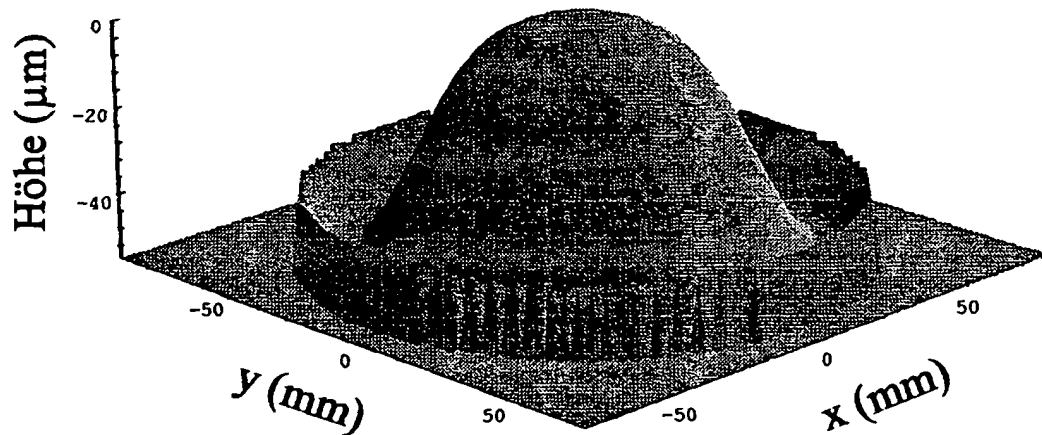


Abb. 4 Beispiel für eine mittels reaktivem Plasmastrahlätzen hergestellte Oberflächenform.

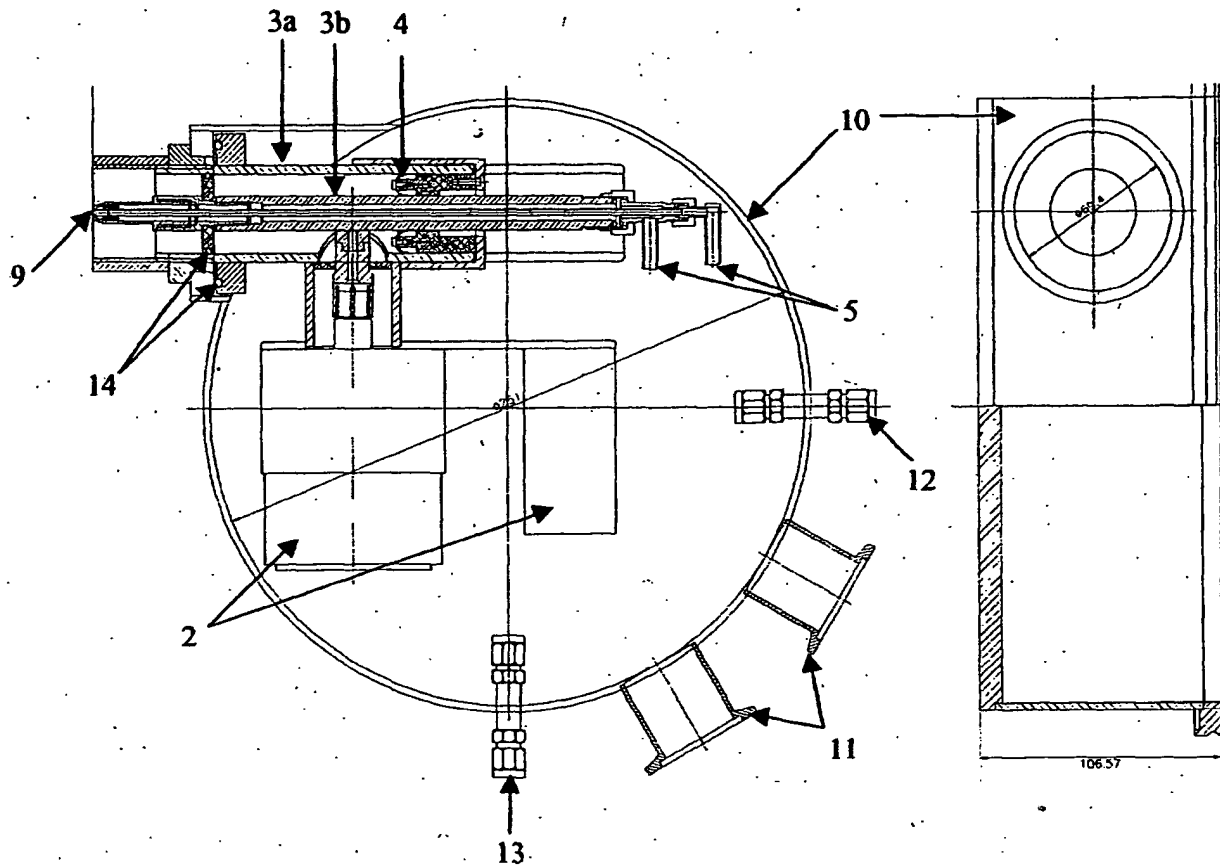


Abb. 5 Anordnung der Plasmaquelle in einem vakuumdichten und druckfesten Behälter

DE 199 25 790 A 1

Federal Republic of Germany  
German Patent Office

Unexamined German Patent Application  
DE 199 25 790 A1

Int. Cl. <sup>7</sup>:

H 01 J 37 / 32  
B 23 K 10 / 00  
H 05 H 1 / 46  
C 23 F 4 / 00

File No.:

199 25 790.6

Date of application:

06. 05. 1999

Date laid open for public inspection:

12. 07. 2000

Applicant:

Institut für Oberflächenmodifizierung e. V.  
Leipzig, DE

Inventor(s):

Böhm, Georg, grad. physic, 04299 Leipzig,  
DE; Frank, Wilfried, grad. physic, Dr.,  
04209 Leipzig, DE; Schindler, Axel, grad.  
Physic, Dr. habil., 04668 Grossbothen, DE;  
Bigl, Frieder, grad. Physic, Prof. Dr., 04249  
Leipzig, DE.

For the assessment of patentability the  
following printed publications have been  
considered:

DE 195 11 915 C2  
DE 39 05 303 C2  
DE 196 41 439 A1  
DE 40 04 560 A1  
DE 38 73 193 T2  
FR 25 47 693 A1  
US 53 02 237  
US 50 63 329  
US 46 11 108  
EP 07 10 054 A1  
WO 97 45 856 A1

The following information has been derived from the documents submitted by the  
applicant.

Title:

Process And Device For The Treatment Of  
Optical And Other Surfaces By Means Of  
High Rate Plasma Processes.

The high rate precision treatment process for optical and other materials, according to this invention, uses as a tool, which, on the basis of removal or deposition of substrate material caused by plasma-chemical reactions, a plasma beam source, is fed by a highly reactive form-stable, rotationally symmetrical, localized, gas discharge plasma beam, that is spatially mostly separated from the generating system, and generated by a microwave field at the end of a microwave wave guide, in which arrangement the inner conductor of the coaxial cable is designed in such a way that, in its interior, two or more reactive and / or inert working gases can be separately routed to the open end of the inner conductor, which functions as a nozzle. The effective cross-section between the substrate surface and the gas discharge plasma, which is generated through interaction between the exiting gases and the microwave field, is normally smaller than the dimensions of the substrate surface, and its shaping, by way of removal or deposition, is accomplished in that the substrate and the tool are moved, in relation to each other, with changing or constant speed, in a linear and / or rotating mode. Due to the axial dimensions of the plasma beam of between one and several ten millimeters, the distance between gas exit and substrate surface in this process can be selected to be big enough for even the treatment of strongly curved or structured surfaces ....

[Figure]

[Legend of figure:]

- 1 Treatment chamber
- 2 Microwave generator
- 3 3a/3b coaxial conductors with inner conductor 3b
- 4 Sliding bridge
- 5 Gas inlet
- 6 Substrate holder
- 7 System that can be moved in a linear (x direction and y direction) and rotational direction
- 8 Plasma beam
- 9 Gas outlet

[Subtext figure:]

Schematic drawing of an arrangement for high rate treatment by means of the plasma beam process, with the plasma source being located in the wall of the treatment chamber.

## Description

### Area of Application

The invention concerns a process and a device for the local treatment of surfaces with high rates of removal and deposition by means of a reactive, microwave-excited plasma beam.

### State of the Art

Known treatment processes for the production of precise surface configurations of substrates or layers, in particular in optics, microelectronics or micro system technology, as concerns processes for the removal of material, aside from the abrasive methods of grinding, lapping, polishing, single diamond lathing or milling, are wet chemical etching processes or ion or ion beam etching processes, or combination processes such as chemo-mechanical polishing. As far as coating processes are concerned, they are mainly chemical processes, CVD, physical sputtering deposition methods or laser or plasma coating processes. In this range of technologies, plasma processes have been found to be particularly advantageous because of high process speeds due to high removal and deposition rates, because they are rather easy on the material of the substrate surfaces and coatings that are to be treated (no mechanical contact with the surface during the treatment), and also because of good controllability (sequential local treatment with and without masks).

The advantage of plasma processes as opposed to ion processes lies in the fact that the low kinetic energy of ions in plasma results in less damage being inflicted on layers near the surface; the energy of the ions in the plasma decreases as excitation frequency increases. With dependence on pressure (up to normal pressure), it is also possible to generate plasma with a high density of reactive species, thus allowing high removal or deposition rates to be achieved and technical costs to be substantially reduced in terms of the vacuum technology required.

In this context, the diode arrangement used by Zarowin and Co. to generate plasma with local action (US Patent No.: 4,668,366), in which the surface to be treated either consists directly of an electrode of an RF parallel plate arrangement or is mounted on one, can only be employed if we accept the loss of the above-mentioned advantage of low ion energy. Another clear disadvantage emerges in cases where extremely thick dielectric substrates and/or dielectric substrates of differing thickness are involved, in terms of the associated extreme/non-homogenous weakness of the electric RF field and thus of the etching action which, in this method, is largely determined by the kinetic energy of the ions. One alternative to this method is offered by the so-called "downstream" arrangement: here, the plasma is generated within an electrode arrangement which is open on one side and independent of the substrate; the pressure of the gases in its wake then causes it to be expelled through the open side to whatever distance is required to

bring it into contact with the substrate surface, whereupon a localized action is achieved (e.g. in the form of rotationally symmetrical surface removal).

Building on this method, the group associated with C. B. Zarowin has released a whole series of publications and patents which describe manipulation of the shape of optical surfaces, in particular through the use of targeted overlapping of local material removal combined with dwell/retention time methods ["Rapid, Nonmechanical, Damage Free Figuring Of Optical Surfaces Using Plasma Assisted Chemical Etching (PACE)"; Parts I-II SPIE vol. 966 Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics (1988); pp. 82-97, Bollinger, et al.; "Predicted Polishing Behaviour of Plasma Assisted Chemical Etching (PACE) from a Unified Model of the Temporal Evolution of Etched Surfaces"; SPIE vol. 966 Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics (1988) pp. 98-107, Gallatin, et al.; "Rapid, Non-Contact Damage Free Shaping of Optical and Other Surfaces with Plasma Assisted Chemical Etching" Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control (1989); IEEE pp. 623-626, Zarowin, et al.; "Rapid, Noncontact Optical Figuring of Aspheric Surfaces with Plasma-Assisted Chemical Etching", D. L. Bollinger, G. M. Gallatin, J. Samuels, G. Steinberg, C. B. Zarowin, Hughes Danbury Optical Systems, Inc., from SPIE vol. 1333 Advanced Optical Manufacturing and Testing (1990), pp. 2-14.; C. B. Zarowin, "Basis of Macroscopic and Microscopic Surface Shaping and Smoothing by Plasma Assisted Chemical Etching," J. Vac. Sci. Technol. B 12(6), Nov./Dec. 1994, pp. 3356-3362.; as well as the patent documents US 5,290,382, US 5,291,415, US 5,336,355, US 5,375,064, US 5,376,224, US 5,811,021]. The processes described in these documents use RF plasma as a tool, which is generated from an appropriately selected mixture of inert and/or reactive gases in a chamber, which is open on one side. As a consequence of the geometry used in these processes, only a very small portion of the plasma volume is actually located outside this chamber at a distance of between a few one-tenths of a millimeter and a few millimeters. The cross-section of the interaction between the emerging plasma and the substrate surface, which is located at approximately the same distance across from the open side of the plasma chamber, is smaller than its overall dimensions; the surface treatment is effected through appropriate overlapping of the spatially-restricted effective cross-section by moving the plasma chamber and the substrate surface in relation to each other. Special materials must be employed [US 5,364,496] to prevent unwanted interactions between the reactive plasma located in the chamber and the chamber walls, which are simultaneously serving as electrodes. For optical materials and semiconductors (Si, SiO<sub>2</sub>), etching rates of 3  $\mu\text{m}/\text{min}$  are cited as achievable. Higher rates can be obtained using mixtures with NF<sub>3</sub> added, though this has the disadvantage of making it extremely hard to control the geometry of the removal function at the edges.

It is possible to alter the geometry of the "downstream" arrangement so that the opening in the electrode arrangement functions as a nozzle through which the plasma generated inside the chamber is expelled at high velocity as a result of the gas pressure -- this is referred to as a plasma beam arrangement. The advantage of this layout lies in the fact that the figuring of substrate surfaces can be carried out at correspondingly larger distances due to the axial dimension of the generated plasma beam, which has a length of

between a few millimeters and a few centimeters. In this sense, plasma beam processes are especially suited to local treatment of structured and curved surfaces.

Bárdos et al. report on the local etching action on silicon of a reactive plasma beam produced by an RF-excited cylindrical cathode gas discharge ["Superhigh-rate plasma jet etching of silicon", L. Bárdos, S. Berg, and H.-O. Blom, Appl. Phys. Lett. 55, 1615 (1989)], though they do not provide details on the application of this process for the targeted figuring of surfaces containing Si.

Takino et al. ["Computer numerically controlled plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode for optical fabrication", Appl. Optics 37, 5198 (1998)] describe the shaping of optical surfaces using a plasma beam arrangement operated at high pressure (600-1000 mbar), where a gaseous mixture consisting of helium and SF<sub>6</sub> at a ratio of 99 : 1 is routed through an RF-linked pipe with an internal diameter of a few millimeters at an He flow of 5 sl/min, resulting in the formation of a plasma beam as the mixture emerges from the pipe. Significant etching action can be achieved at distances ranging from a few tenths of a millimeter up to approx. 2 millimeters, particularly across from the pipe wall due to the increased sputter action of a plasma boundary layer with raised ion energy which forms in this area. The cited etching rates lie in the 2.5 mm<sup>3</sup>/h range.

#### Disadvantages of Existing Technology

The processes used by Zarowin et al. for the local treatment of substrate surfaces with the aid of reactive plasma reveal the following key disadvantages: (i) the fact that the generated plasma only emerges beyond the edge of the opening in the electrode arrangement by between a few tenths of a millimeter and a few millimeters has the result of making the local action of the plasma highly dependent on the distance at which the substrate is positioned as well as creating an associated high dependency on vibrations of the arrangement (such as those which can occur at high scan speeds of multi-axial movement, for example), all of which, firstly, requires the use of costly and complex control systems to achieve high machining accuracy and, secondly, restricts the overall dynamics of the treatment; (ii) the danger of contaminating the surface being processed with extraneous impurities, the majority of which stem from the interaction between the intensive local plasma and the construction materials of the plasma source (etching attacks of the reactive species can be especially intense with regard to the walls of the plasma source in situations involving intensive cylindrical cathode discharges); (iii) associated with the previous point, significant problems in guaranteeing the removal functionality of the plasma tool which is stable in terms of both time and geometry due to the changed geometry of the plasma source components, and (iv) greater wear (tool erosion) of the precision mechanical motion system due to corrosion resulting from the highly reactive species which reaches these components, or alternatively higher investment in the technology of the apparatus in order to avoid this problem through the use of appropriate mechanical protection devices.

The process described by Takino and Co. in "Computer numerically controlled plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode for optical fabrication" comes with the substantial disadvantage of a low volume removal rate which is, in fact, achievable with other, technically simpler procedures (ion beam machining), as well as an extremely unfavorable geometry of the cross-section where material has been removed, namely a "hollow beam", which can cause significant problems in surface precision treatment (mathematical deconvolution, machining of small surface details).

On the other hand, the disadvantage described in point (ii) above (contamination of the surface being processed through intensive cylindrical cathode discharges) can, if employed correctly, actually function as a technologically superior variant method for local treatment through material deposition. A patent from Bárdos and Co. (EP 00,166,349) describes such a process in which the pipe electrodes simultaneously function as sacrificial material for coating.

#### Task of the Invention

It is the purpose of this invention to develop a high-rate treatment process, and a device related to this process, for the precise plasma beam-supported machining of flat or curved surfaces and smooth or structured surfaces of substrates or layers, e.g. quartz, Si, SiC, GaAs and others; whereby, the disadvantages of the known technical solutions cited above are overcome. This applies in equal measure both to those disadvantages of known solutions which concern short serviceable lives of precision mechanical components of the plasma unit -- such as linear translation and rotation tables and their electronic components in the treatment chamber affected by long-lasting corrosive chemical species which spread throughout the container -- as well as to those disadvantages which concern the destructive effects of radiated microwave energy on electronic components and organic construction materials in the treatment chamber.

#### Solution Provided by Invention

The solving of this task is accomplished by using a device (plasma beam source), according to the invention, to generate, with the help of a microwave field, a highly reactive plasma beam of defined and scalable geometry and high density, which develops at the end of a coaxial microwave wave guide which is open to one side and which consists of an outer conductor and an inner conductor of appropriate geometry; whereby, the inner conductor of the coaxial conductor is constructed of two or more pipes having a suitable cross-section positioned concentrically to each other. Formation of the reactive plasma beam is effected, according to the invention, by diffusing a gas, which is supplied via an external pipe, into the plasma beam, which is formed through the interaction of an inert flow of gas with the microwave field, in such a way that the plasma beam is simultaneously provided with a temporally and spatially stable shape with an axial span ranging from a few millimeters up to a number of centimeters. This gas either contains the chemically reactive species or alternatively such a substance is generated in the plasma discharge from at least one of its components. An essential element of this solution, according to the invention, is that the highly reactive plasma beam does not



itself have any contact with the system of the microwave conductor or the gas supply system integrated within this. This is closely linked to the most advantageous aspect of this solution, according to the invention, in comparison to currently known technology, in that the plasma does not enter into any kind of wall interaction other than with the substrate itself and, as a consequence, (1.) contamination of the plasma and thus the substrate surface with chemical impurities does not occur and (2.) transfer of heat from the plasma beam to the components of the plasma beam source is avoided, making it unnecessary to employ technically complex methods for cooling the surroundings of the plasma beam outlet at the plasma source.

The application focuses on the efficient generation of surface geometries, primarily of a precise, aspherical nature, which deviate substantially from the original geometry of the surface, through the reactive etch removal of material. From an economic point of view, treatment times in this process are kept short thanks to several factors: the achievement of high etching removal rates, the long-term stability of the plasma beam and the fact that it can be controlled so precisely, as well as the fact that a minimum of maintenance is required and that the etching apparatus is easy to operate. The effective cross-section of the generated reactive plasma beam with the substrate surface is smaller than the dimensions of the substrate. However, it may also be equivalent to the dimensions of the work piece, if smaller work pieces are used with additional structured shapes of the microwave wave guiding element, according to the invention, and in accordance with the known technical principles of surface wave guides (SURFATRON principle, see for example M. Moisan, J. Margot and Z. Zhrzewski "Surface Wave Plasma Sources" in O. A. Popov (Ed.) "High Density Plasma Sources", Noyes Publications, Park Ridge, N. J., USA, 1995, in particular pages 217-246).

The shaping of the substrate through material removal is performed, according to the invention, as follows: the substrate, which is contained in a substrate holder preferably equipped with a substrate heating element, and the tool (plasma beam) are moved in relation to each other in a linear and/or rotating fashion at a speed which may be either constant or variable. This is performed in a vacuum container at a pressure ranging from 10 mbar to 1000 mbar; whereby, the relative motion between the substrate and the plasma beam source, which is, according to the invention, located in a pressure capsule in the same vacuum container, is affected through a computer-controlled movement system.

In certain circumstances it is expedient for this substrate shaping process to be effected by removing material through etching at higher substrate temperatures.

Although this technical solution -- particularly in the detail in which it is described in the example embodiment -- is based on a high-rate etching procedure, the solution as per the invention can also be applied, with the same technical and economic benefits, to the process of depositing material for shaping a surface by employing suitable gases containing the elemental or molecular species to be deposited.

In addition to the technical solution given in the example embodiment, which involves local surface treatment achieved through a dwell time controlled relative motion between

the substrate and the plasma beam source, the process, according to the invention, can also be applied using mask technology or flash technology (e.g. variable masks made from aluminum oxide ceramics provided with geometric hole structures) with the aim, for example, of working deep geometrical structures or structural arrays into the substrate materials at high processing speeds and with great accuracy. Once again, the process, according to the invention, can be applied in this case either as a high-rate removal method or as a high-rate deposition method. For tasks involving particularly complex shapes or the treatment of large surfaces, it is also possible to apply combinations of the process, according to the invention, e.g. the process involving relative motion of the plasma source/substrate together with the simultaneous use of a variable structured mask, whereupon additional advantages over currently known technology emerge in terms of both technical factors and process economics.

The task of protecting sensitive and expensive mechanical motion systems in the treatment chamber from corrosion is solved, according to the invention, by subjecting the whole apparatus to an inerting/protective background gas pressure during operation. This pressure is created, according to the invention, by admitting a suitable gas, which has the necessary protective effect on wires and openings, directly into the casings of the precision mechanical, electronic and even optical and optoelectronic components, from where it is then released through the existing openings in the treatment chamber. This guarantees effective cleansing of the components requiring protection with unburnt gas whilst effectively excluding the possibility of contact being made with corrosive constituents. The protective gas (oxygen from a liquid gas tank is used in the example embodiment presented here) is removed via the pump system along with the other gas constituents in the treatment chamber. The destructive, damaging influence of radiated microwave energy on electronic components and synthetic parts in the treatment chamber is suppressed or avoided, according to the invention, by installing an absorber of sufficient dimensions to deal with vagrant microwave radiation in the treatment chamber. In the example embodiment described here, this absorbing function is performed by a plastic tube with water flowing through it arranged in several coils at a few centimeters distance from the wall of the treatment chamber.

#### Advantages of the Invention

The advantages provided by this invention consist of the following: a reactive plasma beam of high density and scalable dimensions (within certain limits) is generated in such a way that parasitic and thus generally disadvantageous, corrosive, plasma-wall interactions are avoided; with the help of this beam, flat, structured and even curved surfaces of conductive and non-conductive substrates with lateral dimensions widely ranging from millimeters up to meters can be precisely machined by the overlapping of the local effective cross-section with half-width values ranging from approx. 1 mm to some 10 mm at high removal rates of up to 20 mm<sup>3</sup>/min, or alternatively coating rates, in such a way that unwanted contamination of the work piece surface through construction materials is avoided and that the distance between the substrate and the gas emerging from the plasma beam source during the machining process does not represent a critical influence, since, in contrast to known solutions, the effective cross-section in this

example is not subject to any critical dependency on this distance. Further advantages of the invention include non-costly measures, comparable to solutions described, for protecting expensive components of the apparatus in the treatment chamber from corrosive gas species and unwanted microwave radiation.

## Section B: Description of Example Embodiments

### Example 1

This section describes, by means of an example, the manufacture of an optical asphere using the reactive plasma beam etching process. **Diag. 1** shows a schematic view of the arrangement used in this case, consisting of treatment chamber (1) suitable for vacuum application and made from corrosion-proof special steel, containing heatable work piece seat (6, 7) which can be moved in both a linear (x and y directions) and rotating manner via a computer-controlled system, a microwave system (automatically tunable via sliding bridge (4)) consisting of coaxial conductor (3a, 3b) whose open end (9) is also located within the vacuum chamber, as well as microwave generator (2) which is connected directly to the coaxial system. Supply (5) of the inert or reactive gases employed (Ar/He or SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub>) is affected at the end of the coaxial conductor via inner conductor (3b), which is shown in the example as a double-walled tube. Typical process parameters are given in Table 1.

**Diag. 2** shows an example of the cross-section profile of the removal function of plasma beam (8). Typical removal rates with quartz or even with silicon carbide are 1-4  $\mu\text{m/s}$  with half-width values of 5-10 mm. Resulting volume removal rates lie in the range of 1-20  $\text{mm}^3/\text{min.}$  Depending on the process parameters, the axial dimension of the plasma beam will range from a few millimeters up to a number of centimeters. A typical value is approx. 20 mm. The targeted overlapping of the local removal function for shaping large-surface substrates is effected through the computer-controlled movement of the substrate in relation to the plasma beam to achieve the average local dwell times, which are mathematically simulated on the basis of the local removal function. In this example, movement is performed in the meander pattern sketched in **Diag. 3**. **Diag. 4** shows a surface shape produced using the reactive plasma beam etching method with a machined depth of approx. 30  $\mu\text{m}$ . The workpiece here consisted of a piece of polished quartz with an external diameter of approx. 140 mm and a thickness of approx. 25 mm. Machining time was approx. 2 hours.

### Example 2

The complete microwave system used to generate a reactive plasma beam (plasma source) may also be located in the treatment chamber suitable for vacuum application (**Diag. 1, (1)**) when carrying out substrate treatment such as that described in Example 1. This is achieved by installing the individual components in a vacuum-tight, pressure-resistant container, which is filled either with air or with an inert gas in order to avoid high voltage flashovers.

A diagrammatic view of this "capsule" plasma beam source is provided in **Diag. 5**.

Source housing (10) contains microwave generator (2) and coaxial conductor (3a, 3b) which is sealed off from the treatment chamber by vacuum seals (13) and whose open end, which simultaneously functions as gas outlet (9), protrudes into the treatment chamber. Gas intake into the inner conductor of coaxial conductor (3b), depicted in the example as a double-walled pipe, is effected via supply connection (5). The source fill gas -- in this example air under atmospheric pressure -- is admitted through intake (12). The cooling water used to cool microwave generator (2) is supplied and carried away via supply connection (13), depicted as a double pipe system. The electric power supply cable and the signal lines are flange-mounted on inlet ducts (11). Computer-controlled tuning of the microwave system is effected via sliding bridge (4).

#### Patent Claims

1. Process for high rate treatment of material surfaces using a plasma beam source, wherein a highly reactive plasma beam of defined and scalable geometry and high density generated using a microwave field develops at the end of a coaxial microwave wave guide, which is open to one side and which consists of an outer conductor and an inner conductor of appropriate geometry; whereby, the inner conductor of the coaxial conductor is constructed of two or more pipes having a suitable cross-section positioned concentrically to each other, and wherein formation of the reactive plasma beam is effected by diffusing a gas, supplied via an external pipe, into the plasma beam formed through the interaction of an inert flow of gas with the microwave field, in such a way that the plasma beam is simultaneously provided with a temporally and spatially stable shape, and wherein the chemically reactive species is either contained in this gas or generated in the plasma discharge from at least one of its components, and wherein the highly reactive plasma beam does not itself have any contact with the system of the microwave conductor or the gas supply system integrated within this, thus guaranteeing that the plasma does not enter into any kind of surface interaction other than with the substrate itself so that, as a consequence, it is free from extraneous impurities.
2. Process of Claim 1, wherein at least one of the process gas components is  $\text{CF}_4$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{NF}_3$  or  $\text{XeF}_2$  and where the plasma beam has contact with the surface of the substrate causing material to be removed through etching. In this process, the cross-section of the plasma beam is smaller than the cross-section of the substrate.
3. Process of Claims 1 and 2, wherein the carrier gas of the plasma discharge excited by microwaves consists of Ar or He.
4. Process of Claims 1, 2 and 3, wherein  $\text{O}_2$  is an additional component in the process gas.
5. Process of Claims 1, 2, 3 and 4, wherein the process is performed at a process pressure of between 10 mbar and 1000 mbar in a container, specifically a treatment chamber.
6. Plasma beam source of Claim 1, wherein this source is installed in a capsule container, which is compression-proof and vacuum-tight in relation to its surroundings, in such a way that the open part of the coaxial microwave guide system and the gas flow system integrated in the inner conductor protrude into the treatment chamber.

7. Process of Claims 1, 2, 3, 4, 5 and 6, wherein the plasma beam source is located together with the substrates in the treatment chamber.
8. Process of Claims 1, 2, 3, 4 and 5, wherein the plasma beam source is built into the wall of the treatment chamber in such a way that the source is located outside the treatment chamber whilst the open part of the coaxial microwave guide system and the gas flow system integrated in the inner conductor protrude into the treatment chamber.
9. Process of Claims 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 and 8, wherein, for the purpose of surface treatment through etched material removal, the substrate is located in a substrate holder and is moved in a linear fashion in relation to the plasma beam by means of a multi-axle motion system.
10. Process of Claims 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 and 8, wherein, for the purpose of enabling treatment to be performed using this etching removal method, the substrate is located in a substrate holder and is moved in a linear and rotating fashion in relation to the plasma beam by means of a multi-axle motion system.
11. Process of Claims 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 and 10, wherein, in addition, the plasma source is moved in relation to the substrate by turning and/or tilting and/or changes in distance between the two.
12. Process of Claims 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 and 11, wherein the substrate holder is heatable and the substrate is heated to temperatures higher than room temperature.
13. Process of Claims 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 and 11, wherein the substrate holder is not heatable.
14. Plasma source of Claims 1, 6 and 7, wherein a non-contact temperature measuring system is integrated in the arrangement to measure substrate temperature.
15. Plasma source of Claims 1, 6, 7 and 14, wherein an optical emission spectrometer is integrated in the arrangement.
16. Plasma source of Claims 1, 6, 7, 14 and 15, wherein the end of the inner conductor and the end of the outer conductor are positioned level with each other.
17. Plasma source of Claims 1, 6, 7, 14, 15 and 16, wherein the end of the inner conductor and the end of the outer conductor are not positioned level with each other.
18. Plasma source of Claims 1, 6, 7, 14, 15, 16 and 17, wherein the inner conductor of the above-mentioned coaxial microwave wave guide is constructed of two or more pipes positioned concentrically to each other, in such a way that a gap remains between each of the pipes through which the gas can flow.
19. Configuration of Claims 1, 6, 7, 14, 15, 16, 17 and 18, wherein two or more gases or gas mixtures flow separately to the end of the above-mentioned coaxial microwave wave guide and emerge from this point.
20. Process of Claims 1 through 19, wherein the plasma beam makes contact with the surface of the substrate, whereupon shaping of the surface is affected through the targeted deposition of material by selecting the appropriate process gas components.
21. Process of Claims 1 through 20, wherein structured variable masks, which may consist of aluminum oxide ceramic, or screens, are positioned between the plasma beam and the substrate, thereby enabling geometric structures to be cut in or deposited at higher machining speeds and with greater accuracy.
22. Process of Claims 1 3 21, wherein, for the purpose of protecting sensitive electronic, optical, optoelectronic and mechanical components of the treatment chamber, this chamber is subjected to an inerting/protective background gas pressure during operation;